Aus dem Institut für physikalische Therapie und
Röntgenologie der Universität München.
Vorstand: Professor Dr. G. Boehm.

Ueber die praktische Bedeutung des Focus-Filmabstandes bei der Herzkymographie

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde
in der gesamten Medizin
verfaßt und einer
Hohen Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität
zu München
vorgelegt von

Karl Schoderer
aus Landshut

1938

Druck: Lengericher Handelsdruckerei, Lengerich i. W.

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Dezember 1938.

Dekan: Professor Dr. Ph. Broemser
Referent: Professor Dr. G. Boehm.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München.

Ueber die praktische Bedeutung des Focus-Filmabstandes bei der Herzkymographie.

Es ist bekannt, daß Focus-Filmabstand und Brennfleckgröße die Schärfezeichnung jeder Röntgenaufnahme stark beeinflussen. Aufnahmen aus größerem Filmabstand und dabei mit relativ günstigem Brennfleck sind nur mit den hoch belastbaren modernen Drehanodengeräten zu machen.

Im Folgenden soll geprüft werden, wie groß bei den besonderen Verhältnissen der Kymographie der Schärfegewinn durch größeren Abstand ist, von welchem minimalen Abstand an die Steigerung der Schärfezeichnung praktisch unbedeutend wird. Ferner wird untersucht, welchen Vorteil die Benützung eines Drehanodengerätes durch seinen kleineren Brennfleck gegenüber einem Apparat mit starrem Brennfleck hat.

Es erwies sich dabei als notwendig, auch auf die anderen Faktoren der Bildgestaltung, wie Wirkung der Verstärkerfolien, der Streuungsverhältnisse, näher einzugehen.

Es wurde zunächst der Versuch gemacht, aus den bereits vorhandenen Herzkymogrammen verschiedener Aufnahmeabstände und Röhren genaue Ergebnisse abzuleiten. Doch das zeigte sich bald als vollkommen unmöglich. Der Eindruck, der sich aus der Durchsicht einer großen Reihe von Aufnahmen ergab, war der, daß alle Aufnahmen in Bezug auf Randschärfe der Kymogrammzacken ungefähr gleichwertig waren, ja, es hatte sogar den Anschein, daß die 2 m Kymogramme infolge der geringeren Deckung in allen Teilen der Aufnahme unschärfer wirkten als die Aufnahmen aus geringeren Abständen. Ein objektives Auswerten war in dieser Weise unmöglich, umsomehr, als die Aufnahmen immer von verschiedenen Patienten stammten. Um weiter zu kommen, gab es nun zwei Möglichkeit, entweder Serien von Aufnahmen desselben Patienten zu machen, oder sich eines Modelles zu bedienen. Da Serienaufnahmen desselben Patienten schon wegen der großen notwendigen Zahl von Aufnahmen undurchführbar waren, blieb nur der zweite Weg. Aufnahmen eines Phantoms entsprechen nie genau den physiologischen Verhältnissen,

aber wenn man sich dabei der Grenzen bewußt bleibt, wie weit die so gewonnenen Ergebnisse in die Praxis übertragen werden dürfen, wird man doch solche Modellaufnahmen anstellen und verwerten dürfen.

Die Wahl des Modelles war ziemlich einfach. Es sollte das Herz oder auch nur ein Teil des Herzrandes in seiner Aktion dargestellt werden. Das Herz ist gegenüber der lufthaltigen Lunge ziemlich absolut schattengebend, der Kontrast wird also in der Kymogrammzacke, zumindest in den Randzacken, unter normalen Aufnahmebedingungen immer genügend vorhanden sein. Die Frage des besten Kontrastes kann natürlich nicht mit Modellaufnahmen gelöst werden. Doch unter der Einschränkung, daß die Frage des Kontrastes bei der Herzaufnahme nicht allzu bedeutungsvoll ist und die Hauptforderung bei Herzkymogrammen genügende Schärfe der Zacken ist, ergibt sich die Berechtigung als Modell einen vollkommen schattengebenden Gegenstand zu nehmen.

Bei allen Aufnahmen, die im Laufe der Untersuchung gemacht wurden, kam ein Stahlpendel zur Anwendung, dessen Querschnitt ein Quadrat von 7 mm Seitenlänge ist. Das Pendel erhielt aus technischen Gründen, um bei einer Belichtungszeit von 2 Sek. wie sie für Herzkymogramme üblich ist, eine gleichmäßig gute Bildgestaltung zu erhalten, eine Ganzschwingungsdauer von 1 Sek. Bei der Länge des Pendels von 34 cm und Schwingungsweiten von höchstens 1 cm kann man für die Höhe einer Kymogrammzacke annehmen, daß das betreffende Pendelstück am Pendelende in allen Punkten gleichmäßig schnell und parallel zur Horizontalebene schwingt.

Es zeigte sich als überflüssig, dem Pendel durch irgendwelche mechanischen oder elektromagnetischen Arretierungen eine vorgeschriebene und immer gleiche Schwingungsweite zu erteilen. Das Pendel erhielt eine ganz roh mit dem Maßstab gemessene Anfangsschwingungsweite von 1 cm. Dann wurde die Aufnahme der unteren Pendelhälfte gemacht. Man brauchte dann auf dem Bild nur die inneren Umkehrpunkte der Kymogrammzacken jeder Pendelseite untereinander zu verbinden. Der Schnittpunkt dieser Linien zeigte genau die Stelle, an der die Schwingungsweite des Pendels gleich seiner Eigendicke, also gleich 7 mm war. Die Zacken an dieser Stelle konnten mit unbedingter Genauigkeit bei allen Aufnahmen miteinander verglichen werden, annäherungsweise galt dies auch für alle Zacken, die von dieser Normalzacke um eine gleiche Zackenzahl entfernt waren. Um die ungefähr gleiche Ausgangsstel-

lung zu erreichen, genügte vollkommen eine einfachste mechanische Winkelarretierung.

Sämtliche Aufnahmen wurden mit Verstärkungsfolie auf Agfa Röntgenpapier gemacht. Es genügte dies für unsere Aufnahmen in jeder Beziehung und hatte den großen Vorteil, daß sich in der weiteren Auswertung der Aufnahmen diese leicht zerschneiden und auf Objektträger aufkleben ließen. Irgend eine Beeinflussung der Ergebnisse durch diese Papieraufnahmen dürfte wohl nicht in Frage kommen. Nach Herz (1) ist der wichtigste qualitative Unterschied zwischen Papier und Film auf dem Gebiete des Kontrastes und des Belichtungsumfanges zu suchen, also gerade auf dem Gebiet, das bei den ganzen Pendelversuchen sowieso unberücksichtigt bleiben muß. Der untere Schwellenwert, dem wohl, wie später noch gezeigt wird, eine Bedeutung für die Unschärfebildung zukommt, ist dagegen bei Röntgenpapier und -film praktisch gleich. Nach Versuchen von Juris (6) ist vor allem auch die Schärfezeichnung, bei allerdings genau gleichen Kontrasten, mikrophotometrisch gemessen bei Papier und Film gleich.

Bei allen Aufnahmen wurde in erster Linie die Schärfe ausgewertet. Bronkhorst gibt in seinem Standardwerk „Kontrast und Schärfe im Röntgenbild“ (2) genaue Angaben über alle Faktoren, die die Bildschärfe beeinflussen. Er zeigt vor allem, wie die Bildschärfe (außer den anderen Faktoren) nicht nur durch die Brennfleckgröße sondern auch durch die Brennfleckform in ihrer Beziehung zum Objektrand, entscheidend beeinflußt wird. Er weist ferner nach, daß einem ungefähr geradlinigen Abfall der Lichtintensitätskurve im Bereich des Halbschattens nicht eine geradlinie, sondern, infolge der Form der Gradationskurven, eine mehr oder weniger S-förmige Schwärzungskurve entspricht. Das bedeutet also praktisch ein Steilerwerden der Kurve und damit eine Verringerung der wirklich sichtbaren Unschärfe. Außer diesen objektiven Erscheinungen, die die Schärfequalität eines Röntgenbildes ändern, geht Bronkhorst aber auch noch auf die subjektiven, nur dem menschlichen Auge wahrnehmbaren Schärfeerscheinungen ein. An erster Stelle steht hier der Grenzkontrast, erklärt, nach Hering, durch Nachkontrast und Simultankontrast. Diese physiologischen Vorgänge lassen dem Auge jede Unschärfe geringer erscheinen, als sie physikalisch gemessen ist. Je größer die Kontraste sind, umso geringer erscheint, bei gleicher Halbschattenbreite, die wahrgenommene Unschärfe. Bronkhorst kommt zu dem Schluß, daß die praktisch sichtbare Unschärfe nur rund 50% der geometrisch-rechnerisch

ermittelten beträgt. Es finden sich in seinem Werk jedoch keine Angaben, in welchem Maßstab sich diese gesamte Unschärfeminderung auf die einzelnen verkleinernden Faktoren verteilt. Ebenso bleibt die Bewegungsunschärfe unberücksichtigt.

Bronkhorst kommt allerdings zu dem Ergebnis, daß diese gesamte Randunschärfe an Bedeutung weit zurücksteht hinter der Detailunschärfe, die durch die Abbildung von Gegenständen entsteht, die kleiner als der Focus sind, sodaß der eigentliche Kernschatten den Film meist gar nicht mehr erreicht. Doch kann diese Art der Unschärfe für unsere Betrachtungen ausgeschaltet werden, da es sich bei der Herzkymographie in den Bildteilen, die in erster Linie zur Darstellung kommen sollen, immer um Objekte handelt, die wesentlich größer als der Brennfleck sind.

In einer kurzen Notiz findet sich die Feststellung, daß sich die Schärfeverhältnisse bei Verwendung anderer Filme mit anderen Gradationskurven wesentlich ändern.

Bei allen folgenden Angaben verstehen wir immer unter „Unschärfe" die Entfernung (in Millimetern) vom vollkommenen Schatten bis zur vollkommenen Aufhellung, gemessen und gerechnet senkrecht zum Schattenrand, also in der Richtung, in der wir die Unschärfe auch sehen. Wenn bei den folgenden Ableitungen die Unschärfe einmal anders bezogen wird, so wird das dann angegeben.

Um die Unschärfe möglichst einwandfrei zu bestimmen, wurde sie auf dreierlei Weise ermittelt:

1. mikroskopisch
2. densographisch
3. rechnerisch

1. Die mikroskopische Methode.

Die mikroskopische Methode ist die subjektive Methode und liefert die kleinsten Werte.

Zu der Messung wurde die zu betrachtende Zacke aus dem Film ausgeschnitten und auf einen Objektträger aufgeklebt, mit dem Schattenrand parallel zum Glasrand. Die Messung wurde immer an genau der gleichen Stelle der Zacken durchgeführt. Dies war nötig, da das Pendel im Laufe seiner Schwingung nicht gleichmäßig schnell schwingt, sondern zuerst eine Beschleunigung und dann wieder eine Hemmung erfährt. Die Messung wurde an dem Punkt der größten Ge-

schwindigkeit, also in Zackenmitte durchgeführt. Dort wurde später auch photographiert, densographiert und die Berechnung vorgenommen.

Unter dem mit quadratischer Linierung versehenen Mikrometerokular wurde bei 24facher Vergrößerung gegen eine Linie des Okulars so weit verschoben, bis der Eindruck entstand, daß alles darüber Befindliche sich im Bereich der vollkommenen Aufhellung befand, und dann am Nonius genau abgelesen. Hierauf wurde so lange weiter verschoben, bis alles unter demselben Strich als vollkommener Schatten erschien, wieder abgelesen, und die Differenz der beiden Messungen als mikroskopisch festgestellte Unschärfe aufgezeichnet. Diese Methode ist nur eine etwas verfeinerte Abwandlung der Betrachtung eines Röntgenbildes im Schaukasten und es haften ihr auch alle Fehler und Erscheinungen an, die bereits genügend oft charakterisiert worden sind. Vor allem nimmt, wie hierbei direkt zahlenmäßig festzustellen war, die Unschärfe mit steigender Helligkeit zu. Grundbedingung zur Erzielung vergleichbarer Werte mußte daher unbedingt eine immer gleiche Beleuchtung sein. Bei unseren undurchsichtigen Papierpräparaten mußten wir zu einer Beleuchtung von oben greifen, in Gestalt einer 30 Watt Punktlampe, die leicht in immer gleicher Entfernung und Neigung eingestellt werden konnte.

Es haftet dieser Methode aber noch ein anderer bedeutungsvoller Fehler an: Der Begriff „vollkommene Schwärzung" ist durchaus subjektiv und überhaupt nicht genau zu fassen. Man dreht wohl so lange an der Mikrometerschraube, bis man den Eindruck hat, daß es an dieser Stelle vollkommen dunkel ist. Doch wenn man um ein halbes Blickfeld weiter nach unten sieht, so wird man mühelos feststellen, daß das Quadrat dort unten doch noch wesentlich dunkler wirkt. Man kann im Mikroskop gar nicht erkennen, wo dieser Uebergang aufhört.

Trotzdem hat diese Methode der Messung ihren Sinn. Sie mißt nämlich, mehr oder weniger genau, die Breite, die uns bei der Betrachtung als Unschärfe imponiert, also nur einen verhältnismäßig kleinen Teil der gesamten Unschärfe, aber doch gerade den Teil, der für die Bildwirkung am wichtigsten ist.

2. Die densographische Methode.

Um über die subjektive Methode der Unschärfemessung hinaus ein objektives, vom menschlichen Auge unabhängiges Maß zu haben, wurde die Unschärfe auch densographisch gemes-

sen. Dazu wurde der von Stumpf (3) beschrieben und von ihm zur kurvenmäßigen Darstellung der Kymogramme benutzte Densograph verwandt.

Die undurchsichtigen Papierbilder waren dazu natürlich vollkommen untauglich. Aber auch ein durchsichtiger Röntgenfilm wäre für diese Untersuchungen nicht in seiner ursprünglichen Gestalt zu verwenden gewesen. Die Unschärfebreite im Kymogramm ist höchstens 1 mm. Bei der vierfachen Uebersetzung des Apparates wird daher auch bei genauester Arbeitsweise der Ungenauigkeitsfaktor so groß, daß eine einwandfreie Auswertung in Frage gestellt wäre. Es wurden daher von all den vorher im Mikroskop untersuchten Präparaten Mikroaufnahmen hergestellt. Die technische Durchführung war sehr einfach mit Hilfe eines Mikroansatzes zur Leica. Auf diese Weise konnten Filmserien von 36 Aufnahmen gemacht und gleichzeitig entwickelt werden. Natürlich läuft man durch diese Umarbeitung des Negativs Gefahr die Schwärzungswerte der Originalaufnahmen zu ändern und zu verfälschen. Diese Gefahr wurde aber auf ein Minimum reduziert

1. durch die Verwendung eines Diapositivfilms von ganz flacher Gradation mit sehr großem Belichtungsspielraum
2. durch die Herstellung großer Serien mit immer gleicher, dabei ziemlich langer und daher genau ablesbarer Belichtungszeit
3. durch die Anwendung vollkommen automatischer, aus der Kleinbildtechnik übernommener Tankentwicklung.

Es wurde zwar (s. S. 4) begründet, daß die Frage des Kontrastes und somit auch der Schwärzung zwischen vollkommenem Schatten und vollkommener Aufhellung überhaupt nicht zur Untersuchung steht. Aber im Bereich der Unschärfe hofften wir doch, durch die Densogrammkurve ein charakteristisches Bild für den Schwärzungsverlauf zu erhalten, und deshalb beachteten wir alle oben angeführten Vorsichtsmaßregeln. Für die Breite der Unschärfe an sich ist es wohl ziemlich gleichgültig, wie die Mikroaufnahmen technisch durchgeführt werden, sofern man nur im Bereich des gleichmäßig steigenden Teiles der Gradationskurve des verwendeten Filmes bleibt.

Um mit dem Lichtspalt des Densographen genau senkrecht durch die Unschärfe zu kommen, wurde auf jeder Aufnahme der Leicafilme ein Bleistiftstrich parallel zum Schattenrand an-

gebracht. Auf diesen Bleistiftstrich wurde vor jeder Densogrammaufnahme der Lichtspalt des Densographen bestmöglich eingerichtet.

Auf dem Densogrammfilm wurde dann die absolute, densographisch bestimmte Unschärfe gemessen als horizontaler Abstand der Punkte, in denen die Kurve aus dem aufsteigenden, bzw. abfallenden Ast des Unschärfeteiles in den waagrechten Teil der gleichmäßigen Schwärzung, bzw. Aufhellung übergeht. Dieser Wert brauchte nur durch 32 geteilt zu werden (8fache Vergrößerung der Mikroaufnahme, 4fache des Densographen), um den gemessenen Wert für die Unschärfe zu erhalten.

3. *Die rechnerische Ableitung der Unschärfeverhältnisse bei dem schwingenden Pendel.*

Mit den beiden angegebenen Methoden der Unschärfemessung konnte mikroskopisch die subjektiv wahrnehmbare Unschärfe, und densographisch die objektiv vorhandene Unschärfe gemessen werden. In diesen Werten sind alle die Faktoren enthalten, die überhaupt an der Bildung der Unschärfe beteiligt sind. Bei der mikroskopischen Methode wird auch der Grenzkontrast erfaßt, während dies bei der densographischen nicht der Fall ist.

Um die beiden Methoden in ihrer Genauigkeit und praktischen Brauchbarkeit zu überprüfen, wurde die Unschärfe, soweit dies möglich ist, auch noch rechnerisch bestimmt.

Für die Entstehung der Randunschärfe lassen sich 5 verschiedene Ursachen anführen:

1. die geometrische Unschärfe
2. die Bewegungsunschärfe
3. die Unschärfe, die in der photochemischen Zusammensetzung des Filmes bzw. Papieres ihren Grund hat
4. die durch Benützung einer Folie entstehende Unschärfe
5. die durch Streustrahlung entstehende Unschärfe.

A. *Die geometrische Unschärfe.*

Da unser Pendel einen größeren Durchmesser als der größte benutzte Brennfleck hat, so brauchen wir keine Rücksicht auf die Detailunschärfe zu nehmen. Wir haben es lediglich mit

Randunschärfe zu tun. Diese errechnet sich nach Bronkhorst aus der Formel

$$U_G = f \cdot \frac{b}{c} \qquad (1)$$

wobei f der Brennfleckdurchmesser, b der Objekt-Filmabstand und c der Objekt-Focusabstand ist.

Wir sind uns wohl bewußt, daß dieser Wert der Maximalwert ist, daß praktisch nur ein Teil dieser Unschärfe zur Auswirkung kommt.

Der aus obiger Formel sich errechnende Wert für die geometrische Unschärfe gilt für das ruhende Pendel. Wie wirkt sich nun diese geometrische Unschärfe aus für das schwingende Pendel, das nicht durch eine Momentaufnahme auf den Film gebannt wird, sondern dadurch, daß ein Spalt an dem Film während der Belichtungszeit vorbeiläuft und so immer eine andere Linie oder genauer, einen anderen Streifen des Filmes von den Röntgenstrahlen treffen läßt?

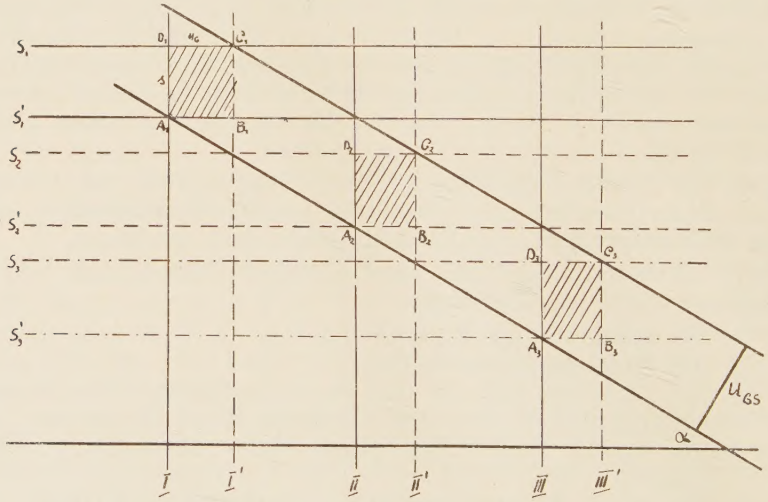

Abb. 1.

Zu Abb. 1:

A_1—A_3 sei der Rand einer Kymogrammzacke, I—III drei Stellungen des Pendels mit I'—III' dem jeweils vor dem Pendel einhergehenden geometrisch bedingten Unschärfestreifen. (Natürlich geht theoretisch die Unschärfe von dem Pendel-

rand aus nicht in einer Richtung, sondern in beiden Richtungen, jeweils um den halben Betrag. Doch ist dies praktisch gleichgültig. Die zeichnerische Darstellung ist auf diese Weise klarer.)

$S_1S'_1$, $S_2S'_2$, $S_3S'_3$, die zu den drei angegebenen Pendelstellungen gehörigen Stellungen des laufenden Rasterschlitzes von der Schlitzbreite s. (Die geometrische Unschärfe U_G und die Schlitzbreite s wurden in der Zeichnung beliebig gewählt. Bei gegebener Neigung der Kymogrammzacken gegen die Horizontale (α) ist dann für jede beliebige Pendelstellung die dazugehörige Spaltstellung automatisch gegeben.

Die schraffierten Vierecke $A_1B_1C_1D_1$, $A_2B_2C_2D_2$, usw. zeigen für jede Spaltstellung die Fläche der jeweiligen geometrischen Unschärfe.

Die Verbindungslinie der Ecken $C_1C_2C_3$ dieser Vierecke gibt also die Grenze der geometrischen Unschärfe in Bezug auf den Zackenrand $A_1A_2A_3$, der gleichzeitig die Grenze des absoluten Schattens ist. Die wirkliche geometrische Unschärfe des schwingenden Pendels berechnet sich also als der Abstand der Geraden A_1A_3 von der Geraden C_1C_3.

(Anm. Alle diese Ableitungen haben natürlich nur ihre Richtigkeit, wenn, wie bereits erwähnt, angenommen werden darf, daß das Pendel nicht in Bögen, sondern in Geraden schwingt, oder mit anderen Worten, daß die Stellungen I—III des Pendels parallel und senkrecht zur Horizontalen sind, während ja theoretisch diese Linien konvergieren. Praktisch sind jedoch die benutzten Schwingungsweiten von höchstens 1 cm so gering, daß die zahlenmäßige Abweichung von obiger Annahme unberücksichtigt bleiben kann.)

Mathematische Ableitung der geometrischen Unschärfe des schwingenden Pendes.

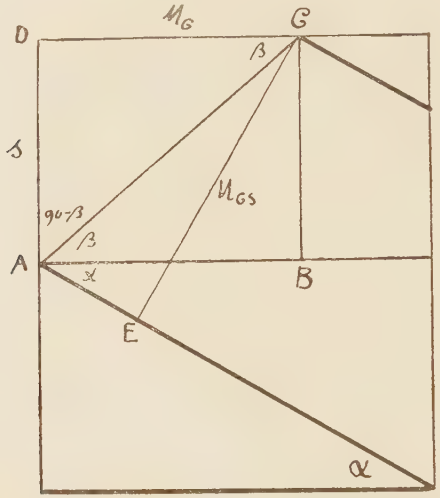

Abb. 2.

Zu Abb. 2:

U_G = CD = geom. Unschärfe des ruhenden Pendels.

U_{GS} = CE = geom. Unschärfe des schwingenden Pendels.

s = DA = Spaltbreite des Rasterschlitzes.

α = Neigung der Kymogrammzacke gegen die Horizontale.

β = Winkel CAB.

Aus Dreieck ACE:

$$U_{GS} = AC \cdot \sin(\alpha + \beta)$$

$$AC = \frac{U_G}{\cos \beta}$$

$$U_{GS} = \frac{U_G}{\cos \beta} \cdot (\sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta)$$

$$U_{GS} = U_G \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha \operatorname{tg} \beta) \text{ u. da } \operatorname{tg} \beta = \frac{s}{U_G}$$

$$U_{GS} = U_G \cdot \sin \alpha + s \cdot \cos \alpha$$

aus (1) $U_G = f \cdot \frac{b}{c}$ folglich:

$$U_{GS} = f \cdot \frac{b}{c} \cdot \sin \alpha + s \cdot \cos \alpha \qquad (2)$$

Die Formel (2) sagt aus, daß zur Errechnung der geometrischen Unschärfe des schwingenden Pendels die geometrische Unschärfe des ruhenden Pendels mit dem Sinus des Neigungswinkels der Kymogrammzacke multipliziert, bei den praktisch sehr kleinen nummerischen Werten dieses Winkels also sehr verkleinert wird. Hinzu kommt jedoch noch als Unschärfe die Spaltbreite, multipliziert mit dem Cosinus desselben Winkels. Eine genauere Würdigung dieser Formel wird noch später gegeben werden.

B. Die Bewegungsunschärfe.

Unter Bewegungsunschärfe versteht man allgemein die Unschärfe, die dadurch hervorgerufen wird, daß das aufgenommene Objekt sich während der Belichtungszeit bewegt. Wenn man von der Vergrößerung durch die verschiedenartigen Projektionsverhältnisse bei verschiedenen Focus-Filmabständen vorläufig absieht, berechnet sich die Bewegungsunschärfe aus der Geschwindigkeit des Objektes, multipliziert mit der Belichtungszeit. Bei der Kymographie liegen nun die Verhältnisse etwas verwickelter.

Die Belichtungszeit für jeden Filmpunkt dauert so lange, wie der Spalt im Raster braucht um an dem betreffenden Punkt vorbei zu laufen. Die gesamte Belichtungszeit sei T, die Schlitzbreite wieder s, und der Abstand von einem oberen Rand eines Schlitzes bis zum oberen Rand des nächsten Schlitzes S. Dann ist die Belichtungszeit eines Film- und damit auch eines Objektpunktes (sofern er parallel zur Schlitzrichtung schwingt, was ja immer angestrebt werden muß)

$$t = \frac{s}{S} \cdot T \qquad (3)$$

Unter der Voraussetzung, daß jeder Pendelpunkt horizontal schwingt (s. S. 11), bewegt sich der Pendelpunkt also um t mal v vorwärts, wobei v die Geschwindigkeit des betreffenden Punktes ist.

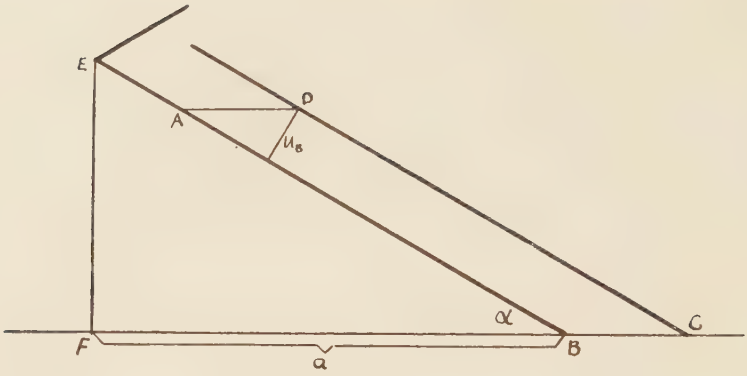

Abb. 3.

Zu Abb. 3:

AD ist die während der Belichtungszeit durch den Punkt A zurückgelegte Strecke. Da jeder Punkt des Pendelrandes dieselbe Strecke zurücklegt, nur jeder dank der Bewegung sowohl des Pendels als des Rasters zu einer anderen Zeit abgebildet wird, ergibt sich als Front der Bewegungsunschärfe die Gerade CD, wenn AB wieder der Zackenrand an der Grenze des absoluten Schattens ist. Bei der Betrachtung einer Kymogrammzacke sehen wir die Unschärfe jedoch nicht in der Richtung AD, sondern senkrecht zum Zackenrand. Die für uns in Betracht kommende Bewegungsunschärfe ist also:

$$U_B = AD \cdot \sin \alpha \qquad \text{oder}$$

$$U_B = t \cdot v \cdot \sin \alpha \qquad (4)$$

Aus den Gesetzen der harmonischen Schwingung folgt, daß die Maximalgeschwindigkeit in Schwingungsmitte $\frac{\pi}{2}$ mal der Durchschnittsgeschwindigkeit ist. Wenn FB bei obenstehender Skizze der Rand einer Kymogrammzacke von innerem bis zu äußerem Umkehrpunkt der Pendelschwingung ist, dann ist EB die während dieser Halbschwingung von einem Pendelpunkt zurückgelegte Strecke. Da der Wert für EB bei den zu untersuchenden Zacken etwas schwierig auszumessen ist, wurde dafür der Wert für FB gemessen (FB fortan „a").

$$EB = a \cdot \cos \alpha$$

Bei der Ganzschwingungsdauer des Pendels von 1 Sekunde ist die Maximalgeschwindigkeit des Pendelpunktes in Zackenmitte folglich

$$v = \frac{\pi}{2} \cdot 2a \cdot \cos\alpha \qquad \text{mit (4):}$$

$$U_B = a \cdot t \cdot \pi \sin\alpha \cos\alpha \qquad \text{zusammen mit (3)}$$

$$U_B = \frac{\pi \cdot a \cdot s \cdot T}{2 \cdot S} \cdot \sin 2\alpha$$

Für den von uns benützten Kymographen ist s = 0.4 mm und S = 12 mm. Diese Spaltbreite s wurde sowohl durch direkte Messung als auch durch eine mikrometrisch ausgemessene Photoaufnahme genau bestimmt.

$$U_B = \frac{\pi}{60} \cdot a \cdot T \cdot \sin 2\alpha \qquad (6)$$

Die Belichtungszeit ist bekannt, a und α lassen sich aus der Kymogrammzacke leicht ausmessen.

Für den Winkel α gilt auch noch eine andere Beziehung:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\text{Rasterablaufgeschwindigkeit}}{\text{durchschnittl. Pendelgeschwindigkeit}}$$

oder für einen beliebigen Punkt P:

$$\operatorname{tg}\alpha_P = \frac{\text{Rasterablaufgeschwindigkeit}}{\text{Pendelgeschwindigkeit in P}} \qquad (7)$$

Mit Hilfe dieser letzten Formel läßt sich für jeden Punkt der Kymogrammzacke die dazugehörige Objektgeschwindigkeit errechnen, allerdings nur unter der Voraussetzung, daß der Organrand sich in einer Ebene parallel zum Film bewegt. Ueber die Darstellung und damit auch die Berechnung anders gerichteter Bewegungen siehe Stumpf (3).

Eine rein rechnerische Erfassung der anderen Unschärfe erzeugenden Faktoren ist unmöglich, sondern kann nur durch Versuche einigermaßen geklärt werden. Die Material-, Streustrahlungs- und Folienunschärfen werden daher auch bei der Auswertung der angestellten Versuche gewürdigt.

C. Veränderung der Größenwerte der Unschärfe durch die Projektionsverhältnisse.

Um alle an der Unschärfebildung beteiligten Faktoren zu berücksichtigen, muß auch noch untersucht werden, ob die Unschärfe durch die Projektionsverhältnisse irgendwie verändert wird.

1. Die geometrische Unschärfe ist ja die durch die Projektionsverhältnisse bedingte Unschärfe. Alle wichtigen Erscheinungen wurden bereits berücksichtigt, allerdings immer unter der Voraussetzung, daß die Projektion senkrecht erfolgt. Die

ganzen Projektionsverhältnisse ändern sich recht erheblich, wenn der Film nicht senkrecht zum Zentralstrahl der Röhre steht. Doch da im allgemeinen angenommen werden darf, daß eine wesentliche Abweichung von der Senkrechten bei der Herzkymographie nicht in Frage kommt, so braucht hier auf deren Einwirkung auf die Unschärfeverhältnisse nicht näher eingegangen zu werden.

2. Anders liegt die Frage bei der Bewegungsunschärfe. Diese ist nicht, wie die geometrische Unschärfe, bereits formelmäßig auf die Abstandsverhältnisse von Film, Objekt und Focus festgelegt, sondern sie entsteht ganz eindeutig am Objekt, und die Ableitung sagt nur, wie sich das Objekt während der Belichtungszeit bewegt, läßt aber vollkommen unberücksichtigt, wie sich diese in der Objektebene abspielende Bewegungsunschärfe auf die Bildebene projiziert. Es muß daher untersucht werden, ob diese Projektion der Unschärfe den endgültigen Wert wesentlich beeinflußt. Wie die später wiedergegebenen Tabellen zeigen, liegt der rechnerisch ermittelte Wert für die Bewegungsunschärfe (ohne Projektionskorrektur) ungefähr um 0.5 mm. Es muß also ausgerechnet werden, wie groß sich ein Gegenstand von 0.5 mm bei den verschiedenen Focus-Filmabständen in der Bildebene abbildet. Es dürfen dabei Gesetze der Zentralprojektion angewandt werden, denn, wie sich mathematisch nachweisen läßt, bleibt diese zusätzliche Unschärfe durch die Brennfleckgröße unberührt.

Die wirkliche Unschärfe ergibt sich also aus der errechneten Bewegungsunschärfe, indem man diese mit dem Verhältnis aus dem Focus-Filmabstand zum Objekt-Filmabstand multipliziert. Da bei unseren Versuchen das Objekt grundsätzlich immer 10 cm vom Film entfernt war und die Focus-Filmabstände im Bereich zwischen 0.50 bis 2.00 m untersucht wurden, müssen die angegebenen Werte für die Unschärfe noch multipliziert werden:

bei einem Focus-Filmabstand von 0.50 m mit $^{5}/_{4}$
1.00 m mit $^{10}/_{9}$
1.20 m mit $^{12}/_{11}$
1.50 m mit $^{15}/_{14}$
2.00 m mit $^{20}/_{19}$

Diese Vergrößerung der Bewegungsunschärfe durch die Projektionsverhältnisse ist immerhin so bedeutend, vor allem bei den niedrigen Focus-Filmabständen, daß dieser Korrekturfaktor nicht außer Acht gelassen werden darf. Die genaue Formel für die Bewegungsunschärfe nimmt damit noch eine etwas andere Form an:

$$U_B = \frac{\pi}{60} \cdot a \cdot T \cdot \sin 2\alpha \cdot \frac{\text{Focus-Filmabstand}}{\text{Objekt-Filmabstand}}$$

$$U_B = \frac{\pi}{60} \cdot a \cdot T \cdot \sin 2\alpha \cdot \frac{d}{b} \qquad (8)$$

3. Die durch die Folienwirkung, die Streustrahlung und durch die chemische Zusammensetzung des Aufnahmematerials bedingte Unschärfe bleibt durch die Projektionsverhältnisse unberührt.

Auswertung der durch Versuche und Berechnung festgestellten Unschärfeverhältnisse.

Bei den Versuchsaufnahmen wurde danach getrachtet, möglichst einheitliche und bei allen Versuchen gleiche Verhältnisse herzustellen. Es wurde bei allen Aufnahmen verwandt:

1. das gleiche Negativmaterial (Agfa Röntgenpapier).
2. der gleiche Entwickler.
3. die gleiche Härte (80 kV max.) der Röhrenstrahlung, ungefiltert. 80 kV entspricht der für Herzkymogramme üblichen Strahlenhärte.
4. die gleiche Ausblendung durch Verwendung desselben Tubus.
5. Es wurde versucht, bei allen Aufnahmen dieselbe Grundschwärzung zu erhalten. Zu diesem Zweck wurde bei einer Aenderung des Focus-Filmabstandes rechnerisch die mA-Zahl bestimmt, die zur Erzielung einer gleichen Schwärzung theoretisch notwendig war. Schwärzungsunterschiede, die trotzdem noch auftraten, wurden, soweit dies möglich war, durch geringfügige Aenderungen der Entwicklungszeit ausgeglichen.
6. Die immer gleiche Schwingungsdauer des Pendels war an sich gegeben. Ueber die Bedeutung der Schwingungsweite s. S. 4.
7. Der dem Film zugekehrte Rand des Pendels war von diesem immer 10 cm entfernt, wie es ungefähr auch der Entfernung des schattengebenden Herzrandes entspricht.
8. Ueber die Vorsichtsmaßnahmen zur Erzielung gleicher mikrophotographischer und densographischer Verhältnisse s. S. 8—9.

I. *Gesamte Unschärfe bei verschiedenen Bedingungen.*

Die Versuchs- und Rechnungsergebnisse lassen sich an Hand einer beliebig herausgegriffenen Tabelle am besten verstehen. Es würde zu weit führen, die Tabellen aller angestellten Versuche hier wiederzugeben. Alle anderen sind nach dem Verhältnis der Zahlen zueinander recht ähnlich.

Zacke	a	α	I	II	III	IV	U_M	U_D
n—4	7	17.30	0.42	0.03	0.04	0.38	0.19	0.79
n	8	16	0.44	0.03	0.04	0.38	0.16	0.56
n+4	9	14.20	0.45	0.03	0.03	0.39	0.17	0.62
n+8	10	13	0.46	0.03	0.03	0.39	0.18	0.66
n+12	11	11.20	0.44	0.03	0.03	0.39	0.19	0.70
n+16	12	10.40	0.46	0.03	0.03	0.39	0.14	0.66
n+20	13	10	0.46	0.03	0.02	0.39	0.19	0.62
n+24	14	9	0.45	0.03	0.02	0.39	0.15	0.56
n+28	15	8	0.46	0.03	0.02	0.39	0.15	0.60

Tab. 1. Rotalixröhre. Focus-Filmabstand 1.50 m Belichtungszeit 2 Sek.

Zu Tab. 1: Die Rubrik: „Zacke" bedeutet: Von der Normalzacke „n" aus, mit der dazugehörigen Pendelschwingungsweite um Eigenbreite, also 7 mm, wurde nach oben und unten auf dem Röntgenbild jede 4. Zacke ausgemessen und berechnet. „a" siehe Skizze! Der Winkel α ist in Graden und Minuten angegeben. U_M und U_D sind die mikroskopisch und densographisch gemessenen Unschärfen in Schwingungsmitte. I—IV sind die errechneten Unschärfen und zwar:

I: die errechnete Bewegungsunschärfe (ohne Projektionskorrektur)

II: die zur Bewegungsunschärfe hinzukommende Unschärfe durch Projektion der primären Bewegungsunschärfe. I + II ist also die gesamte Bewegungsunschärfe aus der Formel (8).

III: der Wert für $f \cdot \frac{b}{c} \cdot \sin \alpha$ aus der Formel (2)

IV: der Wert für $s \cdot \cos \alpha$ aus derselben Formel.

Der Wert für den Winkel α wurde durch Anlegen der Tangente und durch Ausmessen mit dem Transporteur gewonnen, gibt daher nicht genau den gleichmäßigen Abfall des Winkelwertes wieder, wie er nach der Entstehung aus einer Pendelschwingung zu erwarten wäre. Immerhin sind die

durch Messung bestimmten Abweichungen von den genauen geometrischen Werten so klein, daß sie vernachlässigt werden können.

Die auf densographischem Wege erzielten Werte für U_D zeigen verhältnismäßig große Schwankungen, bis zu 0.28 mm. Die objektiv genaue Methode der densographischen Unschärfemessung ist also in dieser Hinsicht auch nicht unbedingt genau. Die Schwankungen erklären sich aus der Art der Ausmessung der Kurve. Die densographische Unschärfekurve ist eine mehr oder weniger S-förmig gekrümmte Kurve, ungefähr in der Lage im Koordinatensystem wie die Gradationskurven. Im oberen und unteren Ast soll die densographische Kurve waagrecht verlaufen und so den erreichten Schatten bzw. die Schwärzung anzeigen. Es ist nun sehr schwierig, den Uebergang in die Waagrechte genau zu erfassen, da die Kurve sich nur sehr langsam an die Horizontale anschmiegt. Kleine Ungenauigkeiten in der Zeichnung können schon zu einer ziemlich bedeutenden Verschiebung des Unschärfewertes führen. Genaue Werte sind daher auch bei der densographischen Methode nicht durch eine einmalige Messung zu erhalten, sondern nur dadurch, daß von jeder zu untersuchenden Stelle mehrere Densogramme angefertigt werden und aus allen gewonnenen Werten der Durchschnittswert genommen wird.

Es wurden aus mehreren Versuchsserien solche Durchschnittswerte der densographischen Unschärfe bei ansteigender Schwingungsweite, also zunehmender Objektgeschwindigkeit, genommen. Dabei zeigte sich, daß bei Ansteigen der Geschwindigkeit die Unschärfe keineswegs größer wird.

Die wechselnde Geschwindigkeit kommt zum Ausdruck in einer Veränderung des Winkels α. Es wird daher rechnerisch nicht nur die reine Bewegungsunschärfe, sondern auch die gesamte geometrisch bedingte Unschärfe durch die Geschwindigkeitsänderungen beeinflußt. Zur besseren Uebersicht noch einmal die Formeln für die Bewegungs- und geometrische Unschärfe:

$$U_B = \frac{\pi}{60} \cdot a \cdot T \cdot \sin 2\alpha \cdot \frac{d}{b} \qquad (8)$$

$$U_{GS} = f \cdot \frac{b}{c} \cdot \sin \alpha + s \cdot \cos \alpha \qquad (2)$$

Aus (8) folgt: Eine Verdoppelung des Wertes von a, wie es in den Tabellen der Fall ist, müßte eine Verdoppelung des Gesamtwertes nach sich ziehen, wenn nicht gleichzeitig der Winkel α dabei auf die Hälfte zurückginge. Bis zu 30 Grad ent-

spricht einer Halbierung des Winkelwertes auch eine Halbierung des Sinuswertes, mit einem Fehler von nur 0.005, der daher für unsere Betrachtungen außer Acht gelassen werden kann. Wie alle angefertigten Tabellen ganz einheitlich erkennen lassen, entspricht aber nun einer Verdoppelung des Wertes für a wirklich eine Halbierung des Winkelwertes. Die rechnerische Bewegungsunschärfe muß also innerhalb gewisser Grenzen, die durch die Winkelgröße gegeben sind, ungefähr konstant bleiben.

Praktisch bewegen sich die Werte für α ja meist zwischen 0 und 15 Grad, also in dem für die Konstanz der Bewegungsunschärfe günstigen Bereich (da in der Formel der Wert für $\sin 2\ \alpha$ vorkommt). Eine beliebige Steigerung der Geschwindigkeit und damit eine Annäherung von α an 0 Grad muß auf die Bewegungsunschärfe ohne Einfluß bleiben.

Im Augenblick des Umkehrens der Bewegungsrichtung, an der Zackenspitze, werden natürlich alle Winkelwerte zwischen 15 und 90 Grad durchlaufen. Für diesen kurzen Bereich gelten die ganzen Ableitungen nicht, sondern die reine Bewegungsunschärfe nimmt mit steigendem Winkel ständig ab, um bei 90 Grad (sin 180) gleich Null zu sein. Für einen Augenblick steht das Organ, die Bewegungsunschärfe ist verschwunden, es gelten allein die geometrischen Unschärfebedingungen.

Auch für den zweiten, die gesamte Unschärfe bestimmenden Faktor, die geometrische Unschärfe, läßt sich diese Unabhängigkeit von der Geschwindigkeit nachweisen. Es ist das nicht so ganz klar, wie es scheinen möchte, denn in den Formeln für die geometrische Unschärfe kommen ja die Winkelwerte, und damit auch die Geschwindigkeit, direkt vor, also ist auch für die geometrische Unschärfe eine Abhängigkeit von der Geschwindigkeit primär gegeben. Wie sich schon bei einer Betrachtung der Formel für die geometrische Unschärfe (2) zeigt, wird der Wert der Summe keine großen Schwankungen aufweisen, da in dem einen Produkt der Sinus und in dem anderen Produkt der Cosinus desselben Winkels vorkommen. Auf eine genaue rechnerische Ableitung sei verzichtet. Aus den Spalten III und IV der Tabelle 1 ist abzulesen, daß der größte Unterschied in der Summe aus III + IV nur 0.01 mm beträgt. Dabei sei darauf hingewiesen, daß in dieser Tabelle der Gesamtwert für U_{GS} besonders große Schwankungen zeigt. Bei fast allen anderen Tabellen, vor allem auch bei denjenigen für die Röhre mit größerem Brenn-

fleck, ist der Wert für III etwas größer, der verhältnismäßige Abfall also geringer. Der Wert für U_{GS} schwankt daher im Durchschnitt um 0.01—0.005 mm. Die Konstanz der geometrischen Unschärfe ist also für wechselnde Objektgeschwindigkeiten mit genügender Genauigkeit erwiesen. Es ist als Ergebnis festzustellen:

Die Unschärfe einer Kymogrammzacke ist, bei sonst gleichen Verhältnissen, von der Geschwindigkeit des Objektes, das die Zacke erzeugt, weitgehend unabhängig.

Für die extremen Winkelwerte gilt:

$\alpha = 90$ Grad: Das Pendel ist in Ruhe. Der Wert für U_B sowohl als für $s \cdot \cos \alpha$ sind gleich Null. Es bleibt allein die geom. Unschärfe $f \cdot \frac{b}{c}$

$\alpha = 0$ Grad: Für diesen Fall der (unendlich) großen Geschwindigkeit bleibt als Unschärfe allein die Spaltbreite s.

In den beiden folgenden Tabellen wird der durchschnittliche Wert aufgestellt, der aus allen Versuchs- und Berechnungsreihen für die gesamte aus geometrischen Bedingungen herrührende Unschärfe gefunden wurde, also den Unschärfen aus den Spalten II und III. In diesen Werten ist alles enthalten, was die Veränderungen des Focus-Filmabstandes sowie der Brennfleckgröße an Einfluß auf die endgültige Unschärfegestaltung ausüben.

Tab. 2. Rotalixröhre, Brennfleckdurchmesser 2.0 mm.

Focus-Film-abstand	Durchschnitt aus II + III	Durchschnitt aus I — IV gesamte Unschärfe	Prozent. Anteil von II + III an der ges. Unschärfe.
0.50 m	0.20	1.10	18.0 %
1.20 m	0,07	0.89	8.0 %
1.50 m	0.06	0.90	6.5 %
2.00 m	0.04	0.87	4.5 %
0.50 m	0.33	1.13	29.0 %
1.20 m	0.12	0.93	13.0 %
1.50 m	0.10	0.93	10.8 %
2.00 m	0.06	0.88	6.7 %

Tab. 3. 10 kW-Röhre, Brennfleckdurchmesser 4.1 mm.

Die Tabellen 2 u. 3 sagen zunächst altbekanntes, daß die geometrische und damit auch die gesamte Unschärfe absinkt, je weiter man mit der Röhre vom Film weggeht. Auffallend ist aber dabei, um welch geringen Grad der Gesamtunschärfe diese Abnahme erfolgt. Nur der Sprung zwischen 0.50 m und 1.20 m Focus-Filmabstand fällt wirklich ins Gewicht. Auch zwischen 1.00 m und 1.20 m ist er, was aus der Tabelle nicht zu ersehen ist, noch einigermaßen von Bedeutung, während er zwischen 1.20 m und 2.00 m vernachlässigt werden kann. Die Schärfezunahme beträgt für die schlechter gestellte 10 kW-Röhre dabei nur 0.05 mm, also einen Wert, der kaum meßbar ist. Diese Schärfeverbesserung wird sogar noch geringer, wenn man bedenkt, daß ja, wenn man die Unschärfe densographisch zu 0.9 mm mißt, nicht nur die gesamte rechnerische Unschärfe, sondern auch noch all die anderen unschärfebildenden Faktoren enthalten sind, wie Folienunschärfe, Streustrahlungsunschärfe, Filmunschärfe. Der wirkliche Schärfegewinn durch einen Focus-Filmabstand von über 1.20 m sinkt damit auf einen auch densographisch nicht mehr faßbaren Wert herab, der jedenfalls noch unter 0.03 mm liegen dürfte. Bei der Rotalixröhre beträgt dieser Schärfegewinn sogar nur die Hälfte.

Bei der 10 kW-Röhre war die aus Belastungsgründen größtmögliche Focusentfernung für Herzkymogramme 1.20 m. Mit der Rotalixröhre ist es möglich weiter weg zu gehen. Aus schärfetechnischen Gründen ist dies jedoch überflüssig. Wenn man trotzdem Kymogramme aus 2 m Entfernung machen will, so können dafür nur die Gründe maßgebend sein, die auch zur Herzfernaufnahme aus 2.00 m geführt haben.

Im Folgenden soll untersucht werden, wie sich der andere große Vorzug der Drehanodenröhre, der kleinere Brennfleck, in der kymographischen Praxis auswirkt. Eine Tabelle gibt hierüber den besten Aufschluß. Die durch den Brennfleck erzeugte Unschärfe kommt allein in dem Wert $f \cdot \frac{b}{c} \cdot \sin \alpha$ zum Ausdruck. In Tabelle 4 ist der prozentuale Anteil dieses Wertes an der gesamten rechnerisch faßbaren Unschärfe für die beiden untersuchten Röhren, die Rotalixröhre mit ihrem Brennfleckdurchmesser von 2.0 mm und die 10 kW-Röhre mit f = 4.1 mm bei den verschiedenen Focus-Filmabständen angegeben, außerdem die rechnerische Unschärfe des ruhenden Pendels, also an der Zackenspitze (α = 90 Grad) bei beiden Röhren.

Tab. 4.

Focus-Film-abstand	proz. Anteil aus $f \cdot \frac{b}{c} \sin \alpha$ für		Unschärfe des ruhend. Pendels	
	f = 2 mm	f = 4.1 mm	f = 2 mm	f = 4.1 mm
0.50 m	7.3 %	20.4 %	0.50	1.02
1.20 m	3.4 %	8.6 %	0.18	0.37
1.50 m	3.3 %	7.5 %	0.14	0.29
2.00 m	2.3 %	4.9 %	0.11	0.22

Wie nicht anders zu erwarten ist, nimmt die durch die Brennfleckgröße bedingte Unschärfe mit wachsender Aufnahmeentfernung ab. Ebenso natürlich ist diese Unschärfe bei der Röhre mit dem großen Brennfleck mehr als doppelt so groß. Es ist also wirklich die nach der Brennfleckgröße zu erwartende Schärfesteigerung vorhanden, aber eben nur für die durch den Brennfleck bedingte Unschärfe. Und diese ist an der gesamten Unschärfe nur in sehr geringem Maße beteiligt. Sie würde bei einem Focus-Filmabstand von 0.50 m wirklich etwas ins Gewicht fallen. Aber bei diesem Abstand ist auf alle Fälle die allgemeine Unschärfe so groß, daß sicher kein Herzkymogramm mit diesem Abstand gemacht wird. Bei unseren Aufnahmen wurde diese Entfernung nur berücksichtigt um den nötigen Ueberblick zu gewinnen.

Wie S. 22 gezeigt wurde, ist 1.20 m die praktisch richtige Entfernung. Dabei entspricht der Vergrößerung des Brennfleckes von 2.0 auf 4.1 mm eine dadurch bewirkte Steigerung der Unschärfe um 0.04 mm. Unter Berücksichtigung der anderen Unschärfe erzeugenden Faktoren kommt man ungefähr auf 0.02—0.03 mm Unschärfesteigerung. Erst Unschärfen von mindestens 0.2 mm werden von dem menschlichen Auge überhaupt wahrgenommen. Diese durch den größeren Brennfleck verursachte Unschärfe in der Herzkymographie liegt also noch rund 80 % unter der Wahrnehmbarkeitsgrenze. Bei Vergrößerung des Focus-Filmabstandes geht dieser Unschärfeunterschied noch weiter zurück. Das ist allerdings bedeutungslos, weil ja mit der 10 kW-Röhre Herzkymogramme aus mehr als 1.20 m Entfernung nicht gemacht werden können.

In dem letzten Abschnitt der Tabelle 4 ist die rechnerische Unschärfe für das ruhende Pendel zusammengestellt, also die Unschärfe, die an der Umkehrstelle der Pendelschwingung

allein übrig bleibt. Für diese Stelle ist die Ueberlegenheit der Röhre mit dem kleineren Brennfleck ohne weiteres gegeben

Diese Unschärfe an der Zackenspitze konnte weder mikroskopisch noch densographisch gemessen werden. Bei der sehr schnellen Richtungsänderung der Pendelbewegung kann an der Zackenspitze keine Tangente mit genügender Genauigkeit angelegt werden, die Richtung, in der die Messung zu erfolgen hatte, war daher nicht festzustellen und die ganze Messung nicht durchzuführen. Für die Betrachtung mit dem unbewaffneten Auge ist kein Unterschied in der Schärfezeichnung der Zackenenden bei den beiden Röhren wahrzunehmen. Ebensowenig war es densographisch möglich einen Schärfeunterschied an einer Stelle kurz vor der Spitze nachzuweisen, wo bereits ein Tangente anzulegen war. Dieser rechnerisch einwandfrei festgestellte Schärfeunterschied zwischen den beiden Röhren scheint daher nur in einem Stück genau an der Spitze zur Auswirkung zu kommen, das so klein ist, daß es der Beobachtung entgeht.

Außerdem ist wohl auch noch folgendes zu berücksichtigen: Dieser große Unterschied in der Schärfezeichnung ist nur möglich, wenn die geometrische Unschärfe allein, ohne Zusatz von Bewegungsunschärfe zur Wirkung kommt. Je größer die zusätzliche Bewegungsunschärfe wird, desto kleiner wird der Schärfeunterschied. Um für einen einzigen Filmpunkt dieses vollkommene Wegfallen der Bewegungsunschärfe zu erreichen, müßte das Pendel während der ganzen Belichtungszeit dieses Filmpunktes, bei dem normalen Rasterablauf von 2 Sekunden folglich $^1/_6$ Sekunde, stillstehen. Bei dieser Dauer des Stillstandes würde bei einem einzigen Punkt diese Schärfeverbesserung zur Auswirkung kommen. Um wirklich sichtbar zu werden müßte der Pendelstillstand sogar noch etwas länger, ungefähr $^1/_3$ Sekunde, dauern. Bei einer Halbschwingungsdauer von $^1/_2$ Sekunde kann der (praktische) Stillstand höchstens $^1/_8$ Sekunde betragen. Es ist daher bis zur Spitze immer mit zusätzlicher Bewegungsunschärfe zu rechnen. Die Schärfedifferenz bei den beiden Röhren muß daher wesentlich kleiner sein, als nach der Schärfedifferenz bei dem ruhenden Pendel anzunehmen wäre.

Ferner wurden Versuchsreihen mit veränderter Rastergeschwindigkeit angestellt. Der Rasterablauf und damit die Belichtungszeit wurde verdoppelt und verdreifacht und die Aufnahmen in gleicher Weise wie die vorhergegangenen ausgewertet. Das Bild der Kymogrammaufnahme ändert sich be-

kanntlich bei Verlängerung der Belichtungszeit einfach dadurch, daß in dem gleichen Bereich zwischen zwei durch den Spalt hervorgerufenen Querstreifen statt zwei die doppelte und dreifache Zahl von Zacken zu sehen ist. Dies ist nur dadurch möglich, daß sich der Wert für den Winkel α stark verkleinert. Die angegebenen Werte sind die Durchschnittswerte aus jeweils einer ganzen Versuchsserie.

Belichtungszeit	U_M	U_D	ges. rechn. Unschärfe
2 Sek.	0.17	0.64	0.90
4 Sek.	0.22	0.56	0.92
6 Sek.	0.22	0.52	0.86

Tab. 5.

Das Ansteigen der Werte in Tab. 5 für U_M ist allenfalls dadurch zu erklären, daß die beiden letzten Aufnahmen etwas weniger geschwärzt waren und so für das Auge der Eindruck größerer Unschärfe hervorgerufen wurde. Die Schwankungen der berechneten Unschärfe werden dadurch verständlich, daß bei den sehr kleinen Winkelwerten die Messung des Winkels α ziemlich schwierig und damit ungenau ist. Die Tendenz zum Absinken der rechnerischen Werte ist trotzdem erkennbar.

Der Wert für U_D zeigt eine fast regelmäßige Abnahme. Da dieser Wert aus einer ganzen Versuchsserie als Mittelwert gewonnen wurde, ist die Richtigkeit dieses Ergebnisses nicht in Zweifel zu ziehen. Im ersten Augenblick mag es ja widersinnig erscheinen, daß bei längerer Belichtungszeit die Schärfe zunimmt. Wenn man den praktisch unmöglichen Grenzfall der unendlichen Belichtungszeit annimmt, so muß der Winkel α schließlich Null werden. Für diesen Fall bleibt rechnerisch als einzige Unschärfe die Spaltbreite s übrig, in unserem Fall also 0.4 mm. Diesem Wert 0.40 mm muß sich die Unschärfe bei Verlängerung der Belichtungszeit allmählich nähern, die Abnahme der densographisch gemessenen Unschärfe ist also durchaus folgerichtig.

Für die Bildgestaltung ist es gleichgültig, ob diese größere Zackenzahl pro Schlitzabstand durch Verlängerung der Belichtungszeit oder durch Vergrößerung der Pulsfrequenz zustande kommt. Die Unschärfe bei größerer Pulsfrequenz muß

daher der bei entsprechend längerer Belichtungszeit gleich sein. Es nimmt also die Unschärfe der Kymogrammzacken bei Vergrößerung der Pulsfrequenz gleichfalls ab.

II. *Die Unschärfe, die in der photochemischen Zusammensetzung des Filmes, bzw. Papiers ihren Grund hat.*

Aus der Photographie mit sichtbarem Licht ist seit langem bekannt, daß es eine Unschärfe des Aufnahmematerials an sich gibt, eine Unschärfe, die entsteht als Diffusionslichthof innerhalb der photographischen Schicht, ähnlich wie die Unschärfe durch die Folie innerhalb der Folie entsteht. Diese Art von Unschärfe tritt bei der photographischen Technik vor allem bei Ueberbelichtungen auf, ist im Allgemeinen so gering, daß sie nicht bemerkt wird, kann aber bei stärkeren Vergrößerungen störende Erscheinungen erzeugen. Es ist leicht sich vorzustellen, daß bei den Röntgenaufnahmen etwas Aehnliches auch in Erscheinung treten muß, vor allem, da ja bei den Röntgenaufnahmen dickere Schichten als in der gewöhnlichen Photographie verwandt werden und diesen Diffusionslichthöfen daher mehr Gelegenheit zur Entstehung und Ausbreitung gegeben wird. Es sollte nun untersucht werden, wie groß die dadurch bedingte Unschärfe ist oder, mit anderen Worten, wie groß die kleinste auf Röntgenpapier überhaupt erzeugbare Unschärfe ist. Denn wenn durch geeignete Versuchsanordnungen alle anderen Arten von Unschärfe, durch Bewegung, durch geometrische Bedingungen, durch Folienwirkung, durch Streustrahlung, ausgeschaltet würden, dann müßte als einzige minimale Unschärfe noch die Materialunschärfe übrig bleiben.

Das Ergebnis der Versuche entsprach diesen Ueberlegungen. Es wurde eine glattkantige Bleiplatte direkt auf das in schwarzes Papier gewickelte Röntgenpapier gepreßt und aus großem Abstand belichtet. Ebenso wurde das Röntgenpapier direkt gegen den Raster der Kymogrammkassette gepreßt. Das densographisch gemessene Ergebnis war durchaus einheitlich: Es blieb eine Unschärfe von durchschnittlich 0.25 mm, während der kleinste überhaupt gemessene Wert 0.20 mm war. Der eigentliche steile Kontrastabfall vollzog sich dabei über eine Strecke von 0.05 mm, während im Bereich des Schattens wie der Schwärzung nochmals 0.1 mm vergingen, bis die Horizontale in der Kurve erreicht war. Für das Auge, wie auch für das Mikroskop, wirkte das erhaltene Bild vollkommen scharf.

Chantraine (5) gibt grundsätzliche Betrachtungen über die Errechnung einer Unschärfe, wenn diese sich aus zwei oder mehr einzelnen Unschärfen zusammensetzt. Eine einfache Addition der Werte ist zu erwarten, wenn bei beiden Unschärfen der Verlauf des Kontrastabfalles im Gebiet der Unschärfe gleichmäßig ist. Auch wenn ein gleichmäßiger und ein ungleichmäßiger Kontrastabfall zusammentreffen, ist eine einfache Addition der Unschärfe zu erwarten. Wenn zwei Unschärfen, bei denen der Abfall des Kontrastes nicht geradlinig erfolgt, zusammentreffen, ist nicht mit einer einfachen Summenbildung zu rechnen. Größere Abweichungen von der Summe sind jedoch unwahrscheinlich.

In unserem Fall handelt es sich um einen ungefähr gleichmäßigen Kontrastabfall im steilen Stück und einen ungleichmäßigen im flachen Kurventeil. Jede Aufnahme ist mit dieser Unschärfe behaftet. Die Filmunschärfe muß zu der rechnerischen Unschärfe addiert werden. Allerdings wird nur der steile Abfall über 0.05 mm praktisch eine Rolle spielen, während der flache Anteil wahrscheinlich praktisch zu unbedeutend ist, um quantitativ in Erscheinung zu treten.

Bei einem so steilen Abfall, wie innerhalb 0.05 mm, könnte auch eine Trägheit des Densographen eine Rolle spielen. Diese wurde dadurch ausgeschaltet, daß alle Kurven mit dem steilen Abfall so langsam durchgedreht wurden, daß die mechanische Einrichtung sicher Zeit hatte, anzusprechen.

III. *Die Unschärfe, die entsteht durch Benützung einer Folie.*

Mit Ausnahme der Aufnahmen, die dazu dienten, die durch die Folien erzeugte Unschärfe festzustellen, wurde immer mit Verstärkungsfolien gearbeitet. Nicht, weil die Aufnahmen ohne Folien nicht durchführbar gewesen wären, sondern deshalb, weil, soweit dies nur irgend möglich war, dieselben Verhältnisse geschaffen werden sollten, die bei der Herzkymographie auch in Frage kommen. Es ist zur Zeit unmöglich, Herzkymogramme ohne Folien herzustellen.

Ganz einwandfrei steht fest, daß durch die Benutzung einer Folie eine wesentliche Unschärfe in das gesamte Bild getragen wird, die zum Teil allerdings wieder wett gemacht wird durch die bei Benutzung einer Folie gesteigerten Kontraste. Bereits Bronkhorst (2) hat ja auf die innigen Wechselbeziehungen zwischen Kontrast und Schärfe hingewiesen, Chantraine (4 u. 5) hat daraus und aus eigenen zahlreichen Versuchen die Schlußfolgerungen für die Verstärkerfolien ge-

zogen. Er weist nach, daß die Rubrafolie eine Unschärfe von 0.4 mm erzeugt. Allerdings meint Chantraine mit der Zahl 0.4 mm keine wirklich gemessene Unschärfestrecke, sondern er will damit sagen, daß die folienlose Aufnahme eines Gegenstandes mit einer (rechnerisch) ermittelten Unschärfe von 0.4 mm dann eine ebensogroße Deutlichkeit der Einzelheiten zeigt wie eine Aufnahme mit Folie, ohne geometrische Unschärfe, wenn also der Gegenstand auf dem Film liegt. Bei allen Versuchen Chantraines wurde nur diese Detaildeutlichkeit verglichen.

Unsere densographischen Messungen zeigen, ebenso wie auch die schon von Bronkhorst mit einfacheren Mitteln vorgenommenen, daß bei einer rechnerisch bestimmten geometrischen Unschärfe von z. B. 1.0 mm die wirklich vorhandene Unschärfe kleiner ist. Bei der Benutzung einer Folie wird andererseits eine ganz wesentliche Kontraststeigerung erzielt, also eine Unschärfeminderung. Da Chantraine nicht mißt, sondern die Detaildeutlichkeit vergleicht, müßte also die wirkliche Unschärfewirkung der Folien eher noch größer sein. Wie ihm F r a n k e brieflich mitteilte, soll diese wirkliche Unschärfe des Schirmes, wenn große Kontraste nebeneinander gesetzt werden, bis zu 0.9 mm betragen.

Wie eingangs betont, scheint es bei der Herzkymographie einigermaßen berechtigt, nur die Schärfe für sich, ohne ihre Wechselbeziehungen zum Kontrast zu berücksichtigen.

Die von uns angestellten Versuche begannen wieder mit der Ermittlung der Minimalunschärfe der benützten Gehlerfolie als der geringsten überhaupt erzielbaren Unschärfe. Die Versuche erfolgten genau wie die bereits geschilderten ohne Folie. Sie ergaben einen densographisch gemessenen Durchschnitt von 0.43 mm. Sehr schwierig wird die Frage aber nun, wenn untersucht werden soll, was in diesem Wert auf Konto der Folie allein und was auf Konto der Materialunschärfe geht. Einfach zu subtrahieren, wie es nach den Ausführungen Chantraines erlaubt wäre, geht wohl nicht an. Denn schon eine Betrachtung der Bilder mit und ohne Folie zeigt deutlich, daß das Bild mit Folie sicher mehr als doppelte Unschärfe besitzt. Chantraine konnte ja nur den steilen Kontrastabfall untersuchen, während ihm der Kurventeil, der sich langsam an die Horizontale anschmiegt, entgehen mußte. Das beste Ergebnis bekommt man wohl, wenn man in den Kurven die Stellen des schnellen und allmählichen Kontrastabfalles für sich subtrahiert. Allerdings geht damit die objektive Genauigkeit ver-

loren, denn es ist unmöglich aus den Densogrammkurven die Grenze zwischen schnellem und langsamen Anstieg genau zu markieren. Ich mache diesen Versuch auch nur in diesem einzigen Falle, um die so sehr wichtige Frage der Folienunschärfe etwas weiter zu bringen. Die Differenz des steilen Abfalles beträgt demnach 0.16 mm, im flachen Teil 0.04 mm. Die gesamte Unschärfe durch den Film wird also verdoppelt, der wirklich für das Auge Unschärfe erzeugende steile Kurventeil wird dagegen vervierfacht und, was wohl das Wesentliche ist, damit aus der durch das Auge nicht wahrnehmbaren Unschärfe von 0.04 mm in den sehr wohl wahrnehmbaren Bereich von 0.16 mm gerückt. Allerdings sind diese Werte die untere Grenze der Folienunschärfe, erzielt bei ziemlich geringen Schwärzungsunterschieden.

Bei den Aufnahmen eines ruhenden Gegenstandes in einiger Entfernung vom Film, also mit geometrisch bedingter Unschärfe, nahm die gesamte Unschärfe natürlich zu, doch nicht in dem Maße, wie man nach der Rechnung erwarten könnte. Bronkhorst hat schon angegeben, daß sich nur 50 % der rechnerischen Unschärfe wirklich nachweisen lassen. Die Erklärung für diese Tatsache ist wohl, da sie sich auch in unseren objektiven densographischen Messungen nachweisen läßt, nicht, wie Bronkhorst vermutet, hauptsächlich in den Erscheinungen des Grenzkontrastes zu suchen. Die Gradationskurven des verwendeten Aufnahmematerials dürften dabei auch eine bedeutsame Rolle spielen. Bronkhorst hat schon darauf hingewiesen durch seine Angabe, daß sich die Unschärfe mit der Benützung eines anderen Materials ändern kann. Diese Aenderung kann entweder durch verschiedene Filmkorngröße oder durch eine Aenderung der Gradationskurve bedingt sein. Das Filmkorn könnte bei der Unschärfegestaltung nur eine Rolle spielen, wenn ein einzelnes Korn seiner Größenordnung nach gleichzeitig in den vollkommenen Schatten wie in die vollkommene Schwärzung hineinragen könnte. Die kleinste gemessene Unschärfe, wobei sogar nur der steile Teil berücksichtigt wird, ist 0.16 mm, während die Größe des Filmkornes zwischen 0.003—0.001 mm sich bewegt.

Da das Filmkorn nicht an dem Zurückbleiben der praktisch meßbaren Unschärfewerte hinter den berechneten schuld sein kann, so muß die Ursache in der Gradationskurve liegen. Nach Herz (1) kommt auf alle Fälle, auch für das Arbeiten mit Röntgenstrahlen allein, also ohne Benützung einer Folie, bei Film wie bei Papier, ein unterer Schwellenwert in Frage.

Erst wenn dieser Schwellenwert überschritten wird, kann eine sichtbare Schwärzung des Aufnahmematerials eintreten. Die Unschärfe aber ist der Uebergang zwischen Schwärzung und Schatten. Es muß also auf alle Fälle bei der Entstehung der Unschärfe einmal der Fall eintreten, daß die auf den Film wirkende Strahlenmenge so gering wird, daß eine Schwärzung nicht mehr erfolgt. Es kommen noch Strahlen auf den Film, wir sind noch im Unschärfebereich, aber der Film registriert diese Unschärfe nicht mehr. Die Unschärfe muß also kleiner sichtbar werden, als sie rechnerisch ist.

Zur Untersuchung der spezifischen Folienunschärfe bei der Kymographie wurde eine Serie von Aufnahmen des schwingenden Pendels ohne Folie gemacht. Die Verminderung der Unschärfe ist recht beträchtlich. Die densographisch gemessenen Unschärfewerte betrugen im Mittel 0.44 mm. Der Schärfegewinn entsteht hauptsächlich dadurch, daß die Annäherung der Kurven an die Horizontale ziemlich rasch erfolgt. Die Benützung einer Folie bei Kymogrammaufnahmen verschlechtert die Schärfebedingungen also um rund 50 %.

Aus dieser Unschärfe von 0.44 mm ohne Folie lassen sich auch Rückschlüsse darauf ziehen, wieviel von der rechnerischen Unschärfe wirklich zur Abbildung kommt. Nimmt man die rechnerische Unschärfe im Durchschnitt zu 0.9 mm an, scheidet man die Luftstreustrahlung und die Filmunschärfe als relativ bedeutungslos aus, so kommt man zu dem Resultat, daß rund 50 % der rechnerischen Unschärfe auch tatsächlich Unschärfe erzeugen. Das stimmt mit den Angaben Bronkhorsts, der ebenfalls zu einem Ergebnis von 50 % kam, sehr gut überein.

IV. *Die Unschärfe durch Streustrahlung.*

Die Streustrahlung ist am schwierigsten rein zahlenmäßig wie in ihrer Wirkung auf die Bildgestaltung zu erfassen, was hier nicht zusammenfällt, da die Streustrahlung meist nur als Grauschleier auftritt, ohne eine meßbare Unschärfe zu erzeugen. Wie verwickelt das Problem liegt, läßt sich aus folgender Tatsache am besten erkennen: Ein unterbelichtetes Bild ist hoffnungslos. Ein unterbelichtetes Bild mit einem kräftigen Streustrahlenschleier kann unter Umständen verwertbar sein, weil viele Schwärzungswerte, die sonst unsichtbar geblieben wären, dank der zusätzlichen Belichtung durch Streustrahlung die Schwelle der Sichtbarkeit überschreiten und das

ganze Bild damit in den steigenden, brauchbaren Teil der Gradationskurve verlegt wird.

Die Mehrzahl unserer Versuche wurde ohne streuendes Medium gemacht, um die Unschärfewerte nicht auch noch durch die am schwersten faßbaren Werte der Streustrahlung zu belasten.

Durch einige Eigentümlichkeiten der densographischen Kurve kamen wir auf den Gedanken, daß schon die Luftstreustrahlung das Bild beeinflussen könne. Der Bleiraster des Kymographen kann als Streustrahlenblende nur in der Richtung senkrecht zur Spaltrichtung wirken. Dem Wesen der Kymographie entspricht es ja, daß die aufgenommenen Objekte in ihrem vorwiegend dargestellten Rand immer möglichst senkrecht zur Spaltrichtung stehen, also in der Richtung, in der die Streustrahlenblendenwirkung des Rasters am kleinsten ist. Ein Gegenstand, der parallel zum Spalt verläuft, müßte sich also unschärfer darstellen, wenn eine Bedeutung der Luftstreustrahlung wirklich in Frage käme. Es wurde daher ein Kreuz aus dem Material des Pendels bei laufendem Kymogrammraster aufgenommen und die senkrechten und waagrechten Balken des Kreuzes auf ihre Schärfe untersucht. Man konnte keinen Unterschied feststellen. Mit diesem Versuch ist allerdings noch nicht bewiesen, daß die Streustrahlung durch die Luft wirklich keine Rolle spielt, denn wie S. 32 gezeigt wird, beeinflußt ja die Streustrahlung die Schärfe überhaupt nicht wesentlich.

Eine Reihe von Versuchen, die besonders aufschlußreich über die Wirkungen der Streustrahlung waren, wurden von Spiegler (7) angestellt. Wichtig ist davon für uns der Einfluß der Streustrahlung auf die Randschärfe. Solange die Streustrahlung in den Schattenbereich eines Objektes vollkommen homogen einstrahlt, tritt sie nur als allgemeiner Schleier auf und vermindert den Kontrast, ohne die Randschärfe zu beeinflussen. Tritt die Streustrahlung in den Schattenbereich inhomogen ein, so wird dadurch die Randunschärfe vergrößert. Mit zunehmender Entfernung des Objektes vom Film wird die Streustrahlung immer homogener. Es muß also eine kritische Entfernung geben, in der der Uebergang von homogener zu inhomogener Strahlung, vom Grauschleier zur spezifischen Randunschärfe, erfolgt.

Ob die inhomogene Streustrahlung zum Eindruck der Unschärfe führt, hängt allein von der Breite der Einstreuzone ab.

Spiegler kommt zu dem Schluß, daß eine homogene Streustrahlung die Abbildung eines Gegenstandes, allein unter dem Gesichtswinkel „Schärfe" betrachtet, nicht unschärfer gestalten kann.

Der kritische Wert der Objekt-Filmdistanz, unter dem eine Verminderung der Schärfe durch die Streustrahlung zustande kommt, ist von der Ausdehnung des Objektes abhängig. Die kritische Objekt-Filmdistanz ist bei Aufnahmen mit Streustrahlenblende größer als ohne, da bei ersterer infolge der stärkeren Behinderung des Zutritts von Streustrahlung die Bildung einer homogenen Streustrahlung hintan gehalten wird. Bei den Aufnahmen mit Streustrahlenblende umsäumt die durch das Lamellenraster kanalisierte Streustrahlung auch noch den Schatten von Objekten in größerer Filmdistanz mit schmalen Einstreuzonen.

Bei unseren Versuchen zur Feststellung des Einflusses der Streustrahlung auf die Schärfe der Kymogrammzacken konnte leider das Pendel nicht direkt in der streuenden Substanz schwingen. Das Wasser hätte die Pendelschwingungen so stark abgebremst, daß die rechnerischen Bedingungen für gleiche Schärfe (Wert für Winkel α zwischen 0 und 15 Grad) nicht mehr erfüllt und daher ein Vergleich nicht möglich gewesen wäre. Die Versuche wurden genau wie alle vorhergehenden ausgeführt, mit schwingendem Pendel, Objekt-Filmabstand 10 cm, Focus-Filmabstand 1.20 m und Rotalixröhre. Nur wurde zwischen Pendel und Film ein Wasserkasten von 5 cm Dicke aufgestellt, bei einer zweiten Versuchsreihe außerdem noch ein zweiter ebensolcher Wasserkasten zwischen Pendel und Röhre, ganz nahe am Pendel.

Das Ergebnis der densographischen Schärfeuntersuchungen der so gewonnenen Bilder ist im großen und ganzen, daß die Unschärfegröße gleich blieb, vielleicht ein ganz klein wenig anstieg, aber noch innerhalb der Ungenauigkeitsgrenze der ganzen densographischen Unschärfebestimmung. Aus diesem Ergebnis kann nicht sehr viel für die Streustrahlung an sich abgelesen werden. Die geringe Unschärfevergrößerung kann sowohl davon herrühren, daß unterschwellige Unschärfewerte durch den hinzukommenden allgemeinen Schleier überschwellig werden, als auch, nach den Versuchen von Spiegler (7) dadurch, daß der Kymogrammraster als Streustrahlenblende wirkt und eine geringe Verschlechterung der Schärfeverhältnisse mit sich bringt. Jedenfalls scheint es festzustehen, daß die Benützung eines streuenden Mediums keine sehr ins Ge-

wicht fallende Verschlechterung der Unschärfeverhältnisse mit sich bringt. Man wird daher den Pendelversuchen auch in dieser Richtung nicht vorwerfen können, den wirklichen Verhältnissen der Herzkymographie allzu fern gestanden zu haben.

Das Densogramm brachte auf Grund einer unten besprochenen Erscheinung zum Ausdruck, daß durch den Vorsatz von Streukörpern wirklich eine allgemeine Streuung und Schwärzung erzeugt wurde.

V. *Besondere Fragen der Unschärfegestaltung.*

Die densographische Auswertung der Randunschärfen brachte zwei zufällige Nebenbefunde, die noch nicht restlos geklärt zu sein scheinen.

1. Das Kurvenstück, das dem glasklaren Schatten der Originalaufnahme entspricht, verläuft horizontal, wie mit dem Lineal gezogen. Das steile Stück des Anstieges ist auch meist eine gleichmäßig ansteigende Kurve. Sobald der Lichtspalt aber den Bereich der Schwärzung erreicht hat, beginnt der Kurvenpunkt vertikal zu verzittern. Irgend ein System ist nicht in dieses wirre Auf-Ab der Kurve zu bekommen. Diese Erscheinung ist natürlich sehr unangenehm, weil man, zur Feststellung des Punktes, in dem die Kurve die Horizontale erreicht, erst zeichnerisch aus all den Schwankungen das Mittel nehmen muß. Dadurch wird wieder eine neue und wahrscheinlich nicht unbedeutende Ungenauigkeit in die Methode gebracht. Es gelang auch nicht, eine vollkommen befriedigende Erklärung für diese Erscheinung zu finden.

Dies Auf-Ab der Kurve bedeutet natürlich eine Intensitätsschwankung der Schwärzung. Woher kommen aber diese Schwankungen? Das Folienkorn kann nicht schuld sein, weil die Erscheinung bei den Aufnahmen ohne Folie ganz genau so zu beobachten war. Ein Umstand kann vielleicht zur Klärung beitragen. Bei allen Aufnahmen war die Kurve im Bereich des vollkommenen Schattens einfach horizontal. Nur bei den Versuchen mit Streukörpern trat eine Aenderung ein. Jetzt zeigten sich diese Schwankungen auch im Schatten und zwar nahmen sie bei Verwendung der doppelten Dicke streuenden Wassers zu. Trotz dieses Befundes scheint es unmöglich zu sein, der Streuung an sich die Schuld für diese Erscheinung zuschieben zu wollen. Sie trat ja auch schon ohne streuendes Medium (außer Luft, des verwandten Pendels und der Kas-

sette) auf und, das ist wohl das Wesentliche, auch noch in so weiter Entfernung vom Objektrand, daß eine Streuung durch das Objekt wohl auszuschließen ist, und fand sich nur in der Schwärzung. Bei Streuung durch die Kassette müßte im Bereich des Schattens auch diese Unregelmäßigkeit eintreten. Wahrscheinlich ist die Streustrahlung nur der auslösende Faktor, indem sie einen mehr oder weniger starken Schleier erzeugt. Das würde bedeuten, daß diese Schwärzungsunregelmäßigkeit an das Vorhandensein einer, wenn auch an sich gleichmäßigen, Grundschwärzung gebunden ist, ganz gleichgültig, wie diese Schwärzung entsteht. Diese Ungleichheit könnte dann nur mehr von der Entstehung der Schwärzung in der Schicht oder von der Entwicklungsweise abhängen. Das erstere würde bedeuten, daß, wenn auch nicht das einzelne Filmkorn, so doch vielleicht eine Kornballung die Erscheinung verursacht, das letztere, daß die Ausführung der Tankentwicklung kleine Unregelmäßigkeiten in der Schwärzung mit sich bringt. Lewin (9) hat solche Fehlerscheinungen der Tankentwicklung für während der ganzen Entwicklungsdauer unbewegten Entwickler beobachtet und geschildert. Es ist möglich, daß die von uns geübte Methode — den Film bis zur ersten Besichtigung, 2 Minuten bewegungslos im Entwickler hängen zu lassen — zu einem ähnlichen, wenn auch makroskopisch nicht mehr sichtbaren Ergebnis führt.

2. Der Anstieg in der Unschärfe zur vollkommenen Schwärzung (des Originalfilmes) verlief zwar immer fast regelmäßig. Doch der Uebergang vom steilen Stück der Kurve bis zum endgültig horizontalen Verlauf (mit den bereits gemachten Einschränkungen über „Horizontalen Verlauf") vollzieht sich selten gleichmäßig. Vielmehr entsteht der Eindruck, daß die Schwärzung in zwei Stufen erreicht wird. Es zeigen sich, mehr oder weniger deutlich, 2 Höhepunkte der Kurven. Der zweite gibt die Höhe der erreichten vollen Schwärzung an, der erste ist oft kaum niedriger, doch zwischen beiden ist wieder ein deutliches Abfallen der Schwärzung zu beobachten. Bis zum zweiten, höheren Kurvenpunkt muß die gesamte Unschärfe reichen, dieser Wert wurde unter U_D auch allein gemessen. Das erste Ansteigen ist als eine zusätzliche Schwärzung im Bereich der Unschärfe zu werten. Die zusätzliche Schwärzung würde weiterhin dazu beitragen, die gesehene Unschärfe zu verringern. Dieses erste Kurvenmaximum liegt ungefähr an der Stelle, an der der auf den Wirkungen des Grenz- und Simultankontrastes beruhende Mach'sche Streifen

zu sehen ist. Das würde also bedeuten, daß dieser Mach'sche Streifen nicht nur subjektiv zu sehen ist, sondern daß er, zu einem kleinen Prozentsatz, auch eine wirkliche objektive Ursache und Grundlage hat. Aus der Physik ist nach einer persönlichen Mitteilung von Dr. Maier, Röntgenphysiker der Kodak A. G., eine ähnliche Erscheinung bekannt. Deckt man durch einen Karton eine möglichst punktförmige Lichtquelle ab, so sieht man parallel zum Schatten des Kartons einen hellen Streifen laufen, der dem Mach'schen Streifen entspricht. Macht man eine Photoaufnahme der Schattengrenze und mißt die Helligkeiten photometrisch aus, so ist dieser helle Streifen auch objektiv vorhanden. Die Ursache dieser Erscheinung ist noch ungeklärt. Es ist möglich, daß es sich bei den von uns beobachteten Schwärzungserscheinungen um etwas ähnliches handelt. Zu den Beobachtungen ist noch zu bemerken, daß dieses erste Schwärzungsmaximum wechselnd auftrat. Manchmal sehr stark, bis zu gleicher Höhe mit der vollkommenen Schwärzung, in der Mehrzahl der Fälle eben als eine kleine Ausbuchtung der Kurve nach oben hin zu erkennen, in einigen Fällen auch gar nicht vorhanden. Doch wird man aus der kurvenmäßigen Höhe dieser Erscheinung keine großen Schlüsse ziehen dürfen. Der Densograph arbeitet nur in der Horizontalen genau. Die Abszisse aller Kurvenpunkte ist willkürlich durch die Einstellung des Apparates zu wählen. Es war nicht möglich, diese Einstellung während aller angefertigten Densogramme gleich zu belassen oder zu gestalten.

Eine genaue Beobachtung dieser Erscheinung wird sehr erschwert dadurch, daß gerade in diesem Bereich das durch andere Faktoren bedingte vertikale Verzittern der Kurve auftrat.

In diesem Zusammenhang ist interessant, daß Zuppinger (15) in seinen Ueberlegungen über totale Reflexion eine ähnliche Erscheinung theoretisch-rechnerisch dargestellt hat.

Zusammenfassung.

Die Unschärfe der Kymogrammzacken bei der Flächenkymographie des Herzens wird auf dreierlei Art bestimmt:

1. Rechnerisch

Es wird dabei abgeleitet, daß bei einem Focus-Filmabstand von 1.20 m die durch Benützung einer 10 kW-Röhre mit einem Brennfleckdurchmesser von 4.1 mm gegenüber der Drehanode

mit f = 2.0 mm erzielte Unschärfevergrößerung bereits praktisch vernachlässigt werden kann.

Es wird ferner gezeigt, daß eine Vergrößerung des Focus-Filmabstandes auf mehr als 1.20 m eine Verbesserung der Schärfeverhältnisse in so geringem Maße bewirkt, daß es praktisch, nur unter dem Gesichtspunkt der Schärfe, nutzlos ist, Herzkymogramme aus mehr als 1.20 m Abstand zu machen.

Für den Bereich der Bewegungsumkehr an der Zackenspitze gelten diese Ableitungen nicht. Infolge der Abbildung durch den laufenden Raster und der schnellen Bewegungsumkehr erfolgt die Darstellung des Pendels auch in der Ruhestellung an der Zackenspitze nicht mit der geometrischen Unschärfe des ruhenden Pendels allein, sondern es ist bis zur Spitze mit zusätzlicher Bewegungsunschärfe zu rechnen. Der Schärfeunterschied entspricht daher auch an der Spitze nicht der unterschiedlichen Schärfezeichnung des ruhenden Pendels, sondern er muß viel kleiner werden. Ein Schärfeunterschied zwischen den beiden Röhren war auch experimentell im Bereich der Zacken nicht nachzuweisen.

2. Mikroskopisch.

Mit der mikroskopischen Unschärfemessung konnte die Unschärfe im Bereich des steilen Kontrastabfalles bestimmt werden. Doch zeigte sich, daß bei dieser Methode keine sehr genauen Resultate erzielt werden konnten, da es nicht möglich war, bei allen Aufnahmen unbedingt gleiche Schwärzungsverhältnisse herzustellen. Die unkontrollierbare Beeinflussung des Beobachters durch den Grenzkontrast war zu groß. Ferner machte der allmähliche Uebergang des steilen Stücks der Schärfekurve in den flachen Teil eine genaue Beobachtung unmöglich, sodaß die erzielten Werte durchschnittlich viel zu klein sind.

3. Densographisch.

Die densographische Methode ist wohl die genaueste experimentelle Methode.

Bei der densographischen Untersuchung der Unschärfeverhältnisse ergaben sich zwei Eigentümlichkeiten, die noch einer näheren Klärung bedürfen.

a) Das vertikale Verzittern der Kurve, das nur im Bereich der Schwärzung auftritt, bei Zusatz von Streukörpern auch im Bereich des Schattens.

b) Die Erscheinung, die nur als zusätzliche Schwärzung gedeutet werden kann, daß bei fast allen Densogrammkurven die endgültige Schwärzung in zwei Stufen erreicht wird.

Es wurde ferner noch die Wirkung der Folienbenützung und der Streustrahlung auf die Schärfegestaltung untersucht. Die unschärfesteigernde Wirkung der Folie wurde bestätigt gefunden, während ein wesentlicher Einfluß der Streustrahlung auf die Unschärfe nicht nachgewiesen werden konnte.

Die minimale, mit Röntgenpapier erreichbare Unschärfe wurde zu 0.04 mm für den steilen Kurventeil bestimmt. Alle Aufnahmen sind also von vorneherein mit einer Unschärfe von mindestens 0.04 mm belastet.

An dieser Stelle danke ich Herrn Professor Dr. Boehm für die liebenswürdige Ueberlassung des Themas und die Uebernahme des Referates. Mein Dank gilt auch Herrn Oberarzt Dr. Ekert und Herrn Dr. Schorr für die freundliche Unterstützung, die sie mir zuteil werden ließen.

Literaturverzeichnis.

1. R. Herz: Photographische Bemerkungen zum Vergleich von Röntgenaufnahmen auf Film und Papier. Veröffentlichungen Agfa.
2. W. Bronkhorst: Kontrast u. Schärfe im Röntgenbild. Leipzig 1927.
3. Pl. Stumpf: Röntgenkymographische Bewegungslehre innerer Organe. Leipzig 1936.
4. H. Chantraine. Ueber die unscharfe Abbildung. Fortschr. Röntg. Str. Bd. 52, S. 283.
5. H. Chantraine: Ueber die Unschärfe des Verstärkerfilmes. Fortschr. Röntg. Str. Bd. 48, S. 613.
6. K. Juris. Die Zeichenschärfe des Negativpapieres. Fortschr. Röntg. Str. Bd. 48, S. 238.
7. G. Spiegler: Die Streustrahlung in ihrer Wirkung auf die Bildgebung. Fortschr. Röntg. Str. Bd. 51, S. 498.
8. F. Janus: Ueber die Technik der Kymogrammaufnahmen. Fortschr. Röntg. Str. Bd. 50, Kongreßheft, S. 19.
9. H. Lewin: Fehlerscheinungen bei der Tankentwicklung. Wege zur Verbesserung der Entwicklungstechnik. Röntg. Prax. 4. S. 445.
10. H. Lewin: Beobachtungen an Sekundärstrahlenblenden. Fortschr. Röntg. Str. Bd. 36, S. 1208.
11. H. Chantraine: Ueber den Verstärkungsfilm bei Lungenaufnahmen. Fortschr. Röntg. Str. Bd. 42, S. 408.
12. A. Bouwers: Ueber die Technik der Momentaufnahmen. Acta radiol. 12. S. 175.
13. R. Herz: Die photographischen Grundlagen des Röntgenbildes. Leipzig 1929.
14. Fr. M. Groedel: Röntgendiagnostik in der inneren Medizin und ihren Grenzgebieten. München 1936.
15. A. Zuppinger: Die theoretischen Grundlagen und Möglichkeiten der röntgendiagnostischen Weichteiluntersuchung. Leipzig 1935.

Lebenslauf.

Ich, Karl Schoderer wurde am 9. August 1913 in Straubing geboren als Sohn des Regierungsrates Josef Schoderer und seiner Ehefrau Maria, geb. Gebhardt. Von 1919—1923 besuchte ich die Volksschule in Vilsbiburg, anschließend die Oberrealschule in Landshut, wo ich 1932 die Reifeprüfung bestand. Vom Sommerhalbjahr 1932 bis zum Sommerhalbjahr 1937 studierte ich Medizin an der Universität München. Im Sommer 1934 bestand ich die medizinische Vorprüfung, im Herbst 38 die medizinische Hauptprüfung. An der vorliegenden Dissertation arbeitete ich in den Sommerferien 1936 und den folgenden Semestern.